

# Seismic risk scenarios of the Eixample district in Valencia

A. Guardiola-Víllora, L. Basset-Salom

## Abstract

The assessment of damage scenarios and human and material losses is essential for seismic risk reduction, even in regions of low or moderate seismicity. A seismic risk evaluation is carried out in the residential district of Eixample in Valencia (Spain), a district with great historical and architectural value, with predominantly masonry buildings and where most of the modernist heritage of the city is located. Seismic vulnerability has been evaluated following the vulnerability index method [1] obtaining the seismic quality for the residential building stock taking into account the structural typology, maintenance level, age and geometry, and identifying the most vulnerable buildings. Damage probability matrices for deterministic and probabilistic scenarios have subsequently been determined considering a binomial or beta-equivalent probability distribution and, using a geographic information system, scenarios of damage, losses and costs maps have been produced for each earthquake intensity. Results confirm that vulnerability and seismic risk is significant and, therefore, a detailed study will enhance the structural earthquake performance of the buildings in the district, especially if they are protected, helping to reduce human and material losses, and safeguarding the city's heritage. On the other hand, the Special Plan against Earthquake Risk in the Valencia Region, approved in 2011, recommends the development of specific plans in several municipalities including the city of Valencia. This small study can serve as a starting point to be extended to the entire city.

## OPEN ACCESS

**Published:** 01/06/2015

**Accepted:** 10/01/2014

**Submitted:** 23/03/2013

**DOI:**  
10.1016/j.rimni.2014.01.002

## Keywords:

Seismic risk  
Seismic vulnerability  
Residential urban areas  
Damage scenario  
Geographic information system

## Resumen

La evaluación de los escenarios de daño y de pérdidas humanas y materiales es imprescindible para la reducción del riesgo sísmico, incluso en regiones de baja o moderada sismicidad.

Se presenta el estudio del riesgo sísmico del distrito residencial del Eixample de Valencia (España), de gran valor histórico y arquitectónico, en el que predominan los edificios de mampostería y donde se encuentra gran parte del patrimonio modernista de la ciudad.

Se ha evaluado la vulnerabilidad sísmica con el método del índice de vulnerabilidad [1], se ha determinado la calidad sísmica de la edificación residencial según su tipología estructural, estado de conservación, edad y geometría, y se han identificado los edificios más vulnerables. Posteriormente se han determinado las matrices de probabilidad de daño para escenarios deterministas y probabilistas según la distribución binomial o beta equivalente y, finalmente, mediante un sistema de información geográfica se han elaborado mapas de escenarios de daño, pérdidas y costes, para cada intensidad.

Los resultados obtenidos confirman que la vulnerabilidad es elevada y el riesgo sísmico apreciable. Un estudio pormenorizado permitiría mejorar el comportamiento estructural frente a sismo de los edificios del distrito, especialmente si están protegidos, contribuyendo a la reducción de pérdidas humanas y materiales y salvaguardando el patrimonio de la ciudad.

Por otra parte, el Plan Especial frente al Riesgo Sísmico en la Comunitat Valenciana, aprobado en 2011, recomienda la elaboración de planes específicos en varios municipios entre los que se encuentra la ciudad de Valencia. Este estudio a pequeña

escala puede servir como punto de partida haciéndolo extensivo a toda la ciudad.

## Palabras clave

Riesgo sísmico ; Vulnerabilidad sísmica ; Áreas urbanas residenciales ; Escenario de daño ; Sistema de información geográfica

## 1. Introducción

El objetivo de toda evaluación del riesgo sísmico es predecir los daños esperados en los edificios ante un sismo determinado, así como servir de herramienta para el establecimiento de planes de actuación ante esos eventos. La ocurrencia de sismos recientes en núcleos históricos (L'Aquila, 2009 y Lorca, 2011) confirma la necesidad de esta evaluación, que incluye el establecimiento de los escenarios deterministas y probabilistas según la sismicidad de la zona, el análisis lo más detallado posible de la vulnerabilidad de los edificios y la estimación de las pérdidas humanas y materiales esperables.

Como muchas regiones de baja o moderada sismicidad, Valencia presenta un riesgo sísmico elevado debido a la vulnerabilidad de sus edificios ya que, a pesar de que los conocimientos técnicos actuales permiten un diseño y una construcción adecuados frente a acciones sísmicas, la realidad es que hay un gran número de edificios que no reúnen los requisitos necesarios, fundamentalmente porque fueron contruidos antes de la entrada en vigor de la primera normativa sísmica. De hecho, el Plan Especial frente al Riesgo Sísmico en la Comunitat Valenciana (decreto 44/2011 de 29 abril), que incluye un estudio a gran escala de todo el territorio, recomienda la elaboración de un plan específico para la ciudad de Valencia, entre otros municipios.

Este trabajo se centra en los edificios de viviendas del distrito del Eixample de Valencia, de gran valor histórico y arquitectónico, construidos a partir del derribo de las murallas en 1865. La mayoría de los edificios son de mampostería no reforzada, aunque a partir de los años 50 se empiezan a construir edificios de hormigón. Tanto los edificios de mampostería como los de hormigón (excepto los más recientes) se calcularon considerando únicamente acciones verticales, presentando una serie de características que los hacen especialmente vulnerables, tales como la irregularidad en planta y en alzado, los pisos superpuestos, las plantas bajas de mayor altura, el mal estado de conservación, etc. Por otro lado, teniendo en cuenta que actualmente en la zona se están llevando a cabo actuaciones arquitectónicas de distinto tipo (rehabilitación interior, sobreelevación de una o 2 plantas, sustitución completa del edificio manteniendo la fachada, derribo y nueva construcción, etc.), los resultados de la estimación del grado de daño esperado pueden ser muy útiles para identificar los edificios más vulnerables y proponer soluciones que mejoren su comportamiento frente a sismo.

La información necesaria para este estudio (altura de los edificios, edad, dimensiones, sistema estructural, etc.) se ha obtenido principalmente de la base de datos del catastro, de la cartografía digital de la ciudad de Valencia, del Archivo Histórico y de los planes especiales de protección PEP-1 y PEP-2. Esta información se ha completado y revisado posteriormente mediante un exhaustivo trabajo de campo que ha permitido constatar la existencia de nuevos solares generados tras el derribo de la edificación existente (principalmente en el barrio de Ruzafa) y de nuevas edificaciones identificadas como solares en la base de datos del catastro, así como detectar ciertas incongruencias entre edad y tipo estructural en edificios con proyectos de rehabilitación integral, en los que tanto la fachada como parte de la estructura se ha mantenido y reforzado.

La vulnerabilidad se ha calculado mediante el método del índice de vulnerabilidad (VI, por sus siglas en inglés) en su versión desarrollada dentro del marco del proyecto europeo RISK-UE [1]. Este método, considerado el más adecuado para el estudio a gran escala de áreas urbanas [2], consiste en determinar la calidad sísmica de los edificios mediante un VI que se obtiene a partir de la clasificación de las tipologías estructurales. El índice asignado inicialmente se modifica atendiendo a las características específicas de cada edificio que contribuyen positiva o negativamente a su respuesta sísmica, determinando posteriormente las matrices de probabilidad de daño en función del VI calculado y de la intensidad del sismo correspondiente a cada escenario determinista y probabilista.

Finalmente, se ha estimado, para cada escenario, el riesgo sísmico en términos de pérdidas humanas (número potencial de víctimas y personas sin hogar) y económicas (edificios inhabitables y costes), teniendo en cuenta el tipo de edificio, el índice de ocupación, la probabilidad de ocurrencia de cada grado de daño y el coste de reposición o reconstrucción de los edificios [3], [4] and [5], según el coste unitario de ejecución de la edificación residencial marcado por el Instituto Valenciano de la Edificación. Los resultados se expresan en forma de gráficos y de mapas mediante un sistema de información geográfica.

## 2. Descripción del distrito del Eixample

El distrito del Eixample forma parte del Ensanche de la ciudad de Valencia. Con una superficie de 173,3 ha y una población censada de 43.117 habitantes [6], tiene, en la actualidad, 25.113 viviendas agrupadas en 120 manzanas con 2.050 parcelas ocupadas y 93 solares. Está formado por 3 barrios (fig. 1): Pla del Remei (38,7 ha, 6.757 habitantes), Gran Vía (46,9 ha, 11.838 habitantes) y Ruzafa (87,8 ha, 24.522 habitantes).

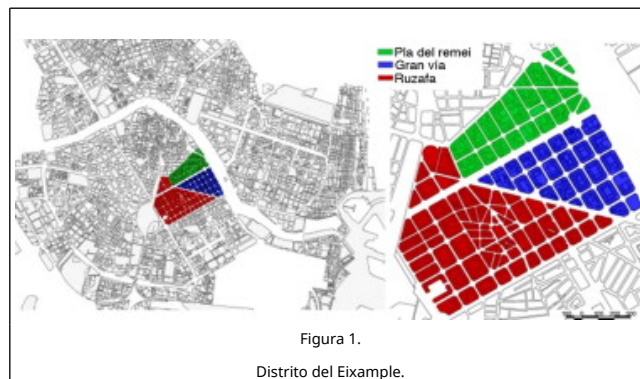


Figura 1.  
Distrito del Eixample.

En 1853, Valencia, con más de 100.000 habitantes, empieza a extender sus límites fuera de las murallas, que se derribarían en 1865. En 1864 y 1876 se promulgan 2 «Leyes de Ensanche», que regulan inicialmente la edificación en esta zona; en 1887 se aprueba el «Proyecto de Primer Ensanche» (Pla del Remei), en 1912 su ampliación (Gran Vía y Ruzafa) y en 1924 «El plan del Ensanche de la ciudad de Valencia».

El Eixample cuenta con 2 planes especiales de protección: «PEP-1» (Ruzafa Norte y Pla del Remei, 2005) y «PEP-2» (Ruzafa Sur y Gran Vía, 2006) y un gran número de edificios catalogados. Como se aprecia en la figura 1, la trama urbana de manzanas cuadradas no es homogénea por tener que adaptarse a las edificaciones preexistentes y al antiguo poblado de Ruzafa, que quedó incorporado a esta expansión de la ciudad.

Por otra parte, las características de la edificación y de la población son diferentes para cada uno de los 3 barrios: el Pla del Remei, incluido en el Conjunto Histórico Artístico del Centro Histórico (declarado en 1993 Bien de Interés Cultural), es el barrio más antiguo y selecto y contiene la mayoría de los edificios modernistas de la ciudad. En él predominan los edificios de muros de carga de mampostería con un estado de conservación aceptable, aunque su cercanía al centro de la ciudad ha propiciado la sobreelevación de algunos edificios antiguos y la construcción de nuevas estructuras de hormigón (fig. 2).

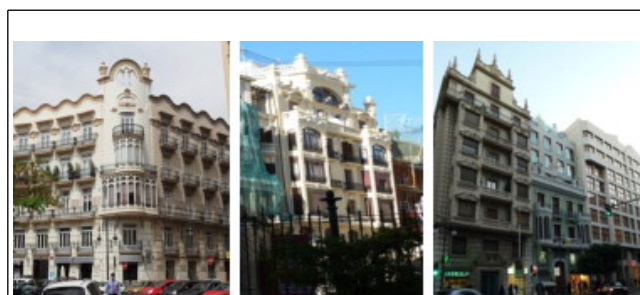


Figura 2.  
Edificios del barrio de Pla del Remei.

En Gran Vía, barrio con mayor altura media y mayor número de edificios con estructura de hormigón, coexisten edificios con proyectos de rehabilitación integral, nuevas edificaciones y edificios originales con un estado de conservación aceptable (fig. 3).

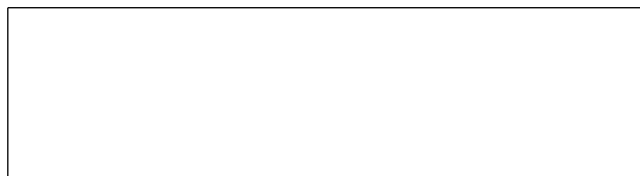




Figura 3.

Edificios del barrio de Gran Vía.

Ruzafa es el barrio de mayor superficie, número de habitantes y densidad, y predomina la tipología estructural de muros de carga de mampostería. Para evitar su degradación progresiva, propiciada por el proyecto del futuro parque central y del enterramiento de la vía férrea, fue declarada en 2008 Área de Rehabilitación Integral concertada. La mayor parte de los edificios se construyeron antes de 1960 y su estado de conservación es bastante heterogéneo (fig. 4).



Figura 4.

Edificios del barrio de Ruzafa.

El sistema constructivo de los edificios se ha determinado a partir de la información incluida en los Planes de Protección PEP-1 y PEP-2, completada con un reconocimiento in situ. El sistema constructivo más frecuente (60% de los edificios) consiste en muros de carga de fábrica de ladrillo no reforzada con forjados unidireccionales de vigas y viguetas de madera o metálicas con revoltón de ladrillo. Un 38% tiene una estructura porticada de hormigón armado con forjados mayoritariamente unidireccionales de viguetas de hormigón y únicamente un 2% tiene una estructura porticada metálica con muros de relleno de mampostería.

En algunos edificios de muros de mampostería hay pilares de fundición en planta baja para conseguir una planta más diáfana y para liberar espacio, reduciendo así la rigidez del edificio (Figura 5 and Figura 6).

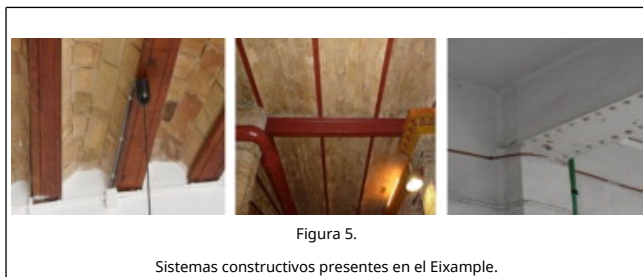


Figura 5.

Sistemas constructivos presentes en el Eixample.



Figura 6.

Pilares de fundición en planta baja.

Las principales tipologías de edificios identificadas en el Eixample (según BTM de Risk-UE [1]) son 4: M3.1, mampostería con forjado de madera; M3.3, mampostería con forjado metálico; RC3.2, estructuras irregulares de pórticos de hormigón; y S3, pórticos metálicos con muros de relleno de mampostería. Posiblemente, algunos de los edificios pertenecientes al periodo 1941-1962, clasificados como estructura de pórticos de hormigón armado, se hayan ejecutado con muros de carga y forjados de viguetas de hormigón y bovedillas, y se ha optado por incluirlos en la categoría de hormigón, RC3.2, por carecer de información al respecto. En las Figura 7 and Figura 8 se representan las alturas y tipologías de edificios por barrios.

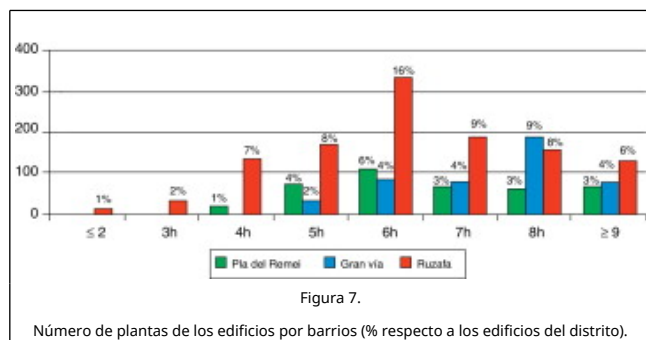


Figura 7.

Número de plantas de los edificios por barrios (% respecto a los edificios del distrito).

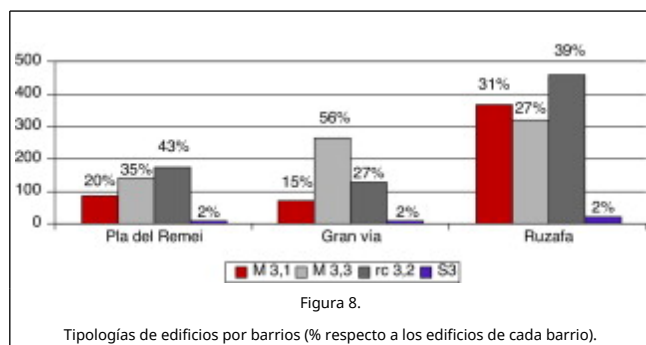


Figura 8.

Tipologías de edificios por barrios (% respecto a los edificios de cada barrio).

Teniendo en cuenta la evolución de las recomendaciones constructivas y la normativa técnica en España, los edificios del Eixample se han agrupado en 7 periodos constructivos (fig. 9).



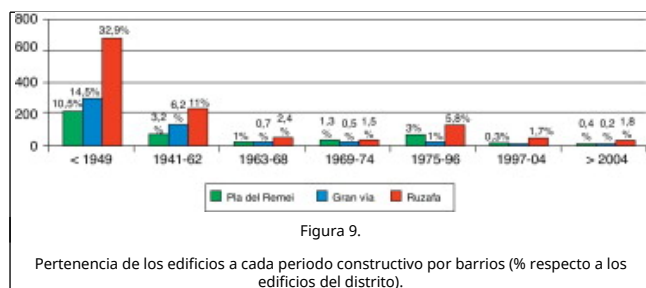


Figura 9.

El periodo anterior a 1940 (58% de los edificios) se caracterizó por la ausencia de normativa. La tipología predominante consistía en muros de carga sin arriostrar, diseñados frente a cargas gravitatorias exclusivamente. Con una calidad de ejecución deplorable, era frecuente encontrarse con proyectos sin dirección facultativa [7].

Tras la guerra civil española, la mayor estabilidad económica propició el uso de materiales de mejor calidad y la mejora de los sistemas constructivos. Al inicio del segundo periodo (1941-1962) predominaban las estructuras de pórticos de hormigón armado, cuyo diseño estuvo regulado por el primer antecedente de normativa técnica: Reglamento sobre restricciones del hierro en la edificación (BOE 02/08/1941) [8]. Este establecía las «Normas técnicas de conocimiento y aplicación inexcusable» que había que considerar en el cálculo y en la ejecución de toda construcción que emplease hierro, recomendando la eliminación de la armadura de compresión en vigas y la minimización de la armadura en elementos a flexión compuesta.

La publicación de la norma MV 101 (1962) «Acciones en la edificación» [9] supuso el inicio del tercer periodo (1963-1968), incluyendo, por vez primera, las acciones sísmicas por considerar en las localidades de grado sísmico  $\geq$  vii (no aplicable en Valencia con grado sísmico v). Además, derogó la disposición restrictiva del uso del hierro, lo que supuso un aumento de las cuantías y de la mejora en la ejecución de las estructuras de hormigón armado.

En el siguiente periodo (1969-1974) se publicó la primera norma sísmica, «Norma Sismorresistente» PGS-1 (1968) [10], que, sin hacer referencia al diseño, incluía prescripciones muy básicas en términos de cálculo estático, siendo las acciones sísmicas de aplicación potestativa en Valencia (zona de sismicidad baja). La publicación de las normas MV supuso una mejora en el diseño y la ejecución de las estructuras de la época.

En la siguiente etapa (1975-1996) se abordó de forma más sistemática el cálculo de estructuras frente a acciones sísmicas –norma sísmica PDS-1 (1974) [11]–, aunque, al ser el mapa de peligrosidad esencialmente el de 1968, siguió siendo necesario considerar las acciones sísmicas en Valencia (zona de sismicidad baja). Por otro lado, en este periodo se transformaron las antiguas MV en las normas básicas de la edificación, de obligado cumplimiento para los agentes del sector, lo que permitió suponer mayor control y calidad en la ejecución.

El inicio del sexto periodo (1997-2004) se ha establecido en el año 1997, considerando el plazo de 2 años de cadencia de la norma sísmica NCSE-94 (BOE 08/02/95) [12]. Este documento supuso un gran salto cualitativo al establecer, además de parámetros de cálculo, reglas de diseño y prescripciones constructivas. Siendo de aplicación a partir de 0,06 g para las edificaciones de importancia normal, implicó para la ciudad de Valencia ( $a_0 = 0,06$  g) la obligatoriedad de calcular la estructura frente al sismo además de respetar las reglas del proyecto y las prescripciones constructivas de la misma.

Dos años después de la publicación de la norma sísmica NCSE-02 [13] (con las mismas condiciones para Valencia que la anterior), se inicia el último periodo.

### 3. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica es la susceptibilidad de una estructura de sufrir un determinado grado de daño en caso de ocurrencia de un evento sísmico determinado. El VI cuantifica, por tanto, el comportamiento sísmico, correspondiendo los valores más elevados a los edificios más vulnerables y los menores a los más resistentes. La vulnerabilidad se ha determinado mediante el método del VI, nivel 1, propuesto en el proyecto Risk-UE [14] que asigna a cada una de las tipologías de edificios un VI probable (VI\*), los límites del intervalo plausible, [VI–; VI+], y los límites inferior y superior de los posibles [VI<sup>min</sup>; VI<sup>max</sup>]. Los VI para las tipologías estructurales representativas del distrito del Eixample son los de la tabla 1.

Tabla 1. Índices de vulnerabilidad para las tipologías BTM, Risk-UE del Eixample

Tipología	VI <sup>min</sup>	VI–	VI*	VI+	VI <sup>max</sup>
M3.1	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M3.3	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
RC3.2	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
S3	0,140	0,330	0,484	0,640	0,860

Fuente: Milutinovic y Trendafiloski [14].

Posteriormente, estos índices se particularizan para cada edificio mediante el modificador regional y los modificadores de comportamiento. Finalmente, el VI total se determina sumando al valor representativo (VI\*) todos los modificadores.

El modificador regional ( $\Delta VR$ ) considera la calidad específica de la edificación a nivel regional, modificando el VI básico. Su valor se ha determinado para cada periodo constructivo (tabla 2), teniendo en cuenta la información técnica, estructural y constructiva del apartado 2. Para los periodos anteriores a 1969 se han asumido los coeficientes adoptados para Barcelona (práctica constructiva deficiente y ausencia de normativa o normativa nacional muy básica) [15] and [16], así como para los periodos de aplicación de las normas sísmicas PGS-1 [10] y PDS-1 [11] ya que, a pesar de ser obligatorias en Barcelona y potestativas en Valencia, se trata de normas muy básicas que, además, carecen de prescripciones de diseño. A partir de 1997, la aplicación de las normas NCSE-94 [12] y NCSE-02 [13] obliga a calcular las estructuras frente al sismo en Valencia. Esta nueva normativa supuso una mejora del cálculo de los edificios en España, confirmada por los expertos que redactaron los informes publicados tras el sismo de Lorca en mayo de 2011 [17], que coincidieron en que las estructuras de hormigón, ejecutadas considerando dichas normas, apenas sufrieron daños estructurales, a pesar de que la aceleración máxima (PGA, por sus siglas en inglés) triplicase la aceleración básica prevista en ambos códigos. Los valores adoptados en este estudio permiten, una vez aplicados al VI básico de la tabla 1, clasificar las estructuras de hormigón de dichos periodos como clase D ( $0,50 \geq VI > 0,34$ ).

Tabla 2. Modificador regional de vulnerabilidad,  $\Delta VR$

Periodo constructivo	M3.1	M3.3	RC3.2	S3
< 1940	+0,198	+0,234	-	+0,234
1941-1962	+0,135	+0,171	+0,228	+0,171

1963-1968	+0,073	+0,109	+0,228	+0,109
1969-1974	+0,01	+0,046	+0,103	+0,046
1975-1996	-0,052	-0,016	-0,022	-0,016
1997-2004			-0,08	-0,08
> 2004			-0,08	-0,08

Fuente: Lantada [15].

Los datos de la edad de los edificios se han obtenido a partir de la base de datos del catastro y los catálogos del plan especial de protección, subsanando ciertas incongruencias (edificios de mampostería de solo 10 años de antigüedad) correspondientes, generalmente, a proyectos de rehabilitación integral en los que la fachada y parte de la estructura se ha mantenido y reforzado, habiendo confirmado la edad tras una inspección visual.

Los modificadores de comportamiento que se han considerado [15] se refieren al estado de conservación, número de plantas, longitud de fachada, irregularidad en planta y volumen, posición del edificio en la manzana y su relación con los colindantes, completando la base de datos del catastro con la información de los planes especiales de protección, y aquellas características del edificio necesarias para calcular los modificadores anteriores obtenidas mediante inspección in situ.

El modificador que tiene en cuenta el estado de conservación de los edificios toma el valor +0,04 si el edificio necesita grandes reparaciones y -0,04 si no las necesita.

El valor del modificador correspondiente al número de plantas de los edificios, en función de la tipología estructural y de la edad (tabla 3), se ha obtenido a partir del número de plantas habitadas (con referencia catastral) sin considerar las construcciones auxiliares.

**Tabla 3. Modificador correspondiente al número de plantas**

Tipología	Plantas	≤ 1940	> 1940
M3.1 M3.3	Bajo (1-2)	-0,02	-0,04
	Medio (3-5)	+0,02	0
	Alto ≥ 6	+0,06	+0,04
RC3.2 S3	Bajo (1-3)	-0,04	
	Medio (4-7)	0	
	Alto ≥ 8	+0,08	

La longitud de los muros de mampostería de fachada influye en la posibilidad de su colapso por la inexistencia de vínculo con los muros de carga interiores. Este modificador se considera para las fachadas de los edificios de mampostería de longitud superior a 15 m, es decir, para el 28% del conjunto estudiado.

La irregularidad en planta se evalúa mediante el coeficiente de compacidad  $r_c$  que relaciona el área en planta del edificio y el área de un círculo con el mismo perímetro, siendo los valores considerados  $M_{ip} = +0,04$  si  $r_c < 0,5$  y  $M_{ip} = +0,02$  si  $0,5 \geq r_c \geq 0,7$ .

El modificador que considera la irregularidad en altura ( $M_{ih} = +0,04$  si  $\delta > 3$  y  $M_{ih} = +0,02$  si  $1 < \delta < 3$ ) se calcula a partir del coeficiente  $\delta$  [15], que representa la diferencia entre el número de plantas del edificio (considerando todas las construcciones de la parcela) y el que tendría otro con el mismo volumen y la misma superficie en planta.

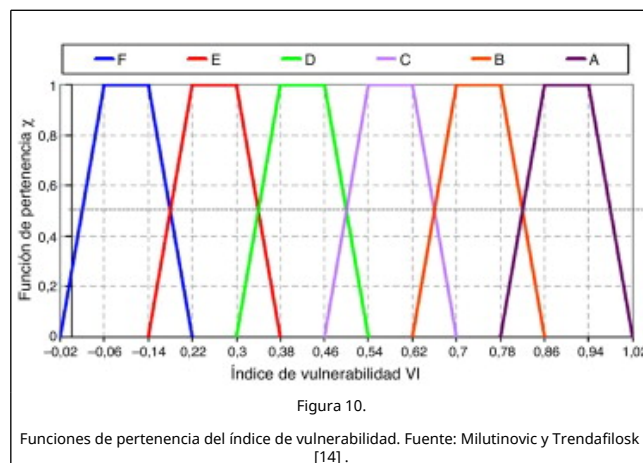
La posición del edificio en la manzana es otro factor determinante, siendo la mejor situación la del edificio entre medianeras (-0,04) y la más desfavorable la del edificio terminal

de manzana (+0,06) o de esquina (+0,04). Asimismo, se ha tenido en cuenta la diferencia de altura superior a 2 plantas de cada edificio con los colindantes, asignando 0,02 o 0,04 con signo positivo si los edificios contiguos son más bajos y negativo si son más altos. Este modificador incrementa el VI de los edificios situados junto a un solar.

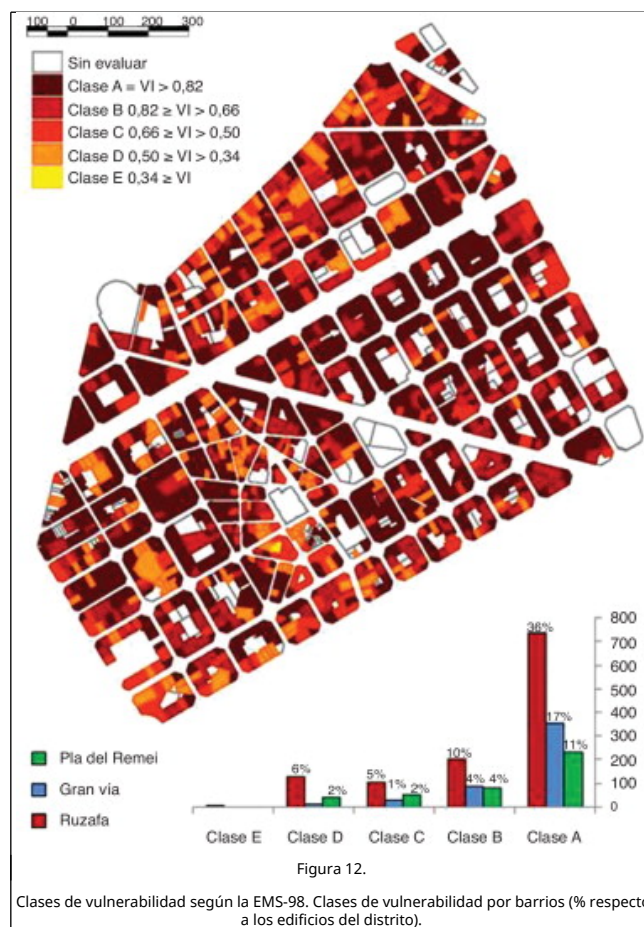
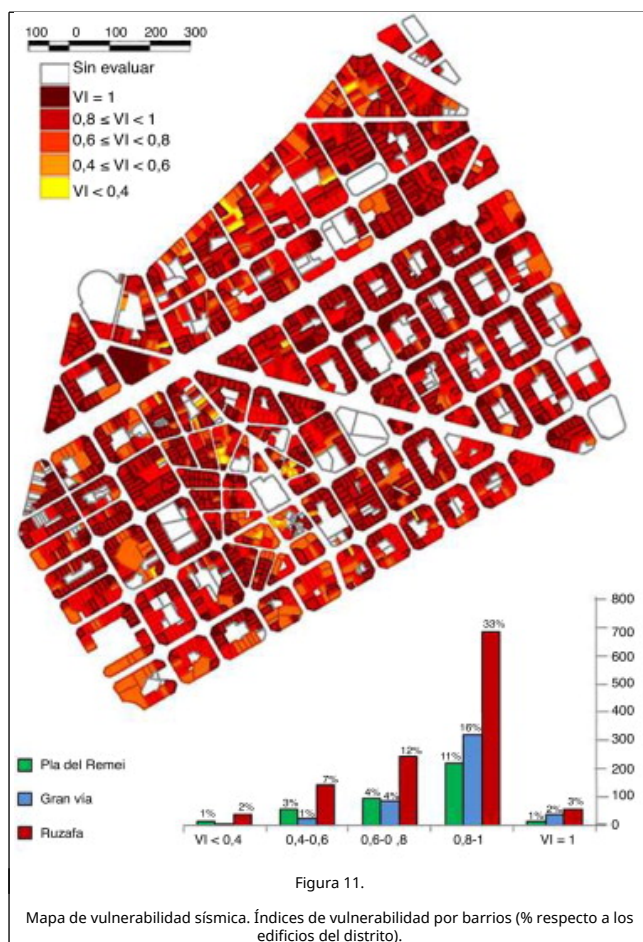
Los datos se han implementado en una hoja de cálculo, determinando, a partir de la tipología estructural, el VI posible ( $VI^*$ ) y, en función de las características del edificio, los modificadores correspondientes. Los valores obtenidos para los distintos campos se han añadido a la tabla de atributos de las parcelas, vinculada a la planimetría correspondiente con el programa GVSig.

El VI total (suma del representativo y todos los modificadores) es, para la mayoría de los edificios de los 3 barrios (60% de la totalidad de los edificios), superior a 0,8; siendo los más vulnerables aquellos situados en los chaflanes de las manzanas.

La pertenencia de los edificios a cada una de las 6 clases de vulnerabilidad (A-F) de la escala EMS-98 se determina a partir de los VI obtenidos y de las funciones de pertenencia del VI [14] para  $\chi = 0,5$  (límites usuales de  $VI^-$ ;  $VI^+$ ) (fig. 10).



Los mapas de vulnerabilidad sísmica y de clases de vulnerabilidad, así como los resultados en porcentaje y número de edificios (índices y clases), por barrios, se representan en las Figura 11 and Figura 12, respectivamente.

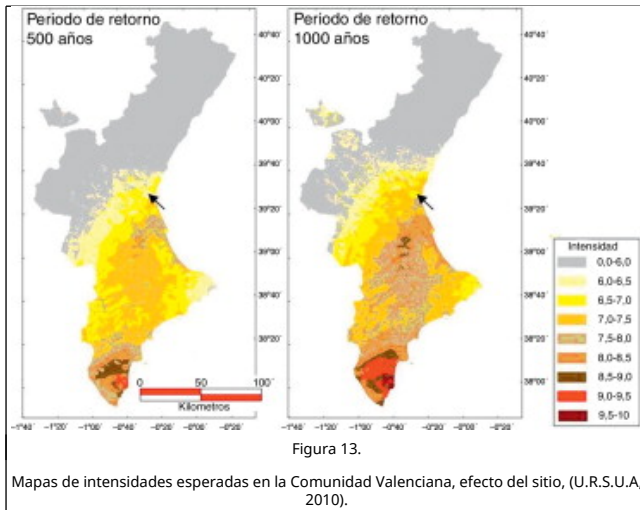


#### 4. Escenarios de riesgo sísmico

Para caracterizar la sismicidad del Eixample se han tenido en cuenta un escenario determinista y 2 probabilistas. La intensidad correspondiente al escenario determinista se establece a partir del mayor terremoto, registrado históricamente, próximo a la ciudad de Valencia. Se trata del terremoto ocurrido en Carlet en 1872 [18], de intensidad vii según la escala EMS-98.

Los escenarios probabilistas se establecen a partir de la información proporcionada por los mapas regionales de intensidad sísmica esperada para la Comunidad Valenciana incluyendo el efecto del suelo (fig. 13), para un periodo de retorno de 500 años [19]. En la ciudad de Valencia se distinguen 3 zonas, siendo el valor de la intensidad esperada para un periodo de retorno de 500 años de 6 a 6,5; de 6,5 a 7; y de 7 a 7,5, respectivamente (el Plan de Riesgo de la Comunitat Valenciana indica una intensidad de 7,5 para todo el término municipal).





Por otra parte, al no disponer de un estudio de microzonación sísmica de la ciudad de Valencia (solo en Ciutat Vella, distrito i, se ha realizado una estimación de la respuesta del sitio [20]) ni de una base de datos del tipo de suelo a escala suficiente, no ha sido posible considerar el efecto diferenciador del suelo para cada parcela.

Se proponen, por tanto, los siguientes escenarios: uno determinista de intensidad vii y 2 probabilistas de intensidades 6 y 7,5 (valores máximo y mínimo) para todo el distrito. La norma NCSE-02 asigna a Valencia una aceleración básica de 0,04 g. Esta se corresponde con una intensidad vi según la relación establecida en la NCSE-94, por lo que los valores adoptados están del lado de la seguridad.

El daño esperado para un edificio se caracteriza mediante el grado de daño medio  $\mu_D$ , que varía entre 0 (daño nulo) y 5 (destrucción) según la escala EMS-98 [21]. Este se obtiene con una función semiempírica [22], a partir del VI para cada intensidad I adoptada (1).

$$\mu_D = 2,5 \cdot \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6,25 \cdot VI - 13,1}{2,3} \right) \right] \quad (1)$$

La probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño se define con la función binomial (2) o la función beta equivalente (3), a partir del grado de daño medio, representando los escenarios de daño en términos de dichas probabilidades. Los parámetros  $t$  y  $r$  de la función beta se ajustan para que esta sea equivalente a la distribución binomial de parámetro  $\mu_D$ , adoptando  $t = 8$  y  $r = t(0,007\mu_D^3 - 0,0525\mu_D^2 + 0,2875\mu_D)$  [22].

$$\text{Función binomial: } k = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad p_B(k) = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left( \frac{\mu_D}{5} \right)^k \left( \frac{5-\mu_D}{5} \right)^{5-k} \quad (2)$$

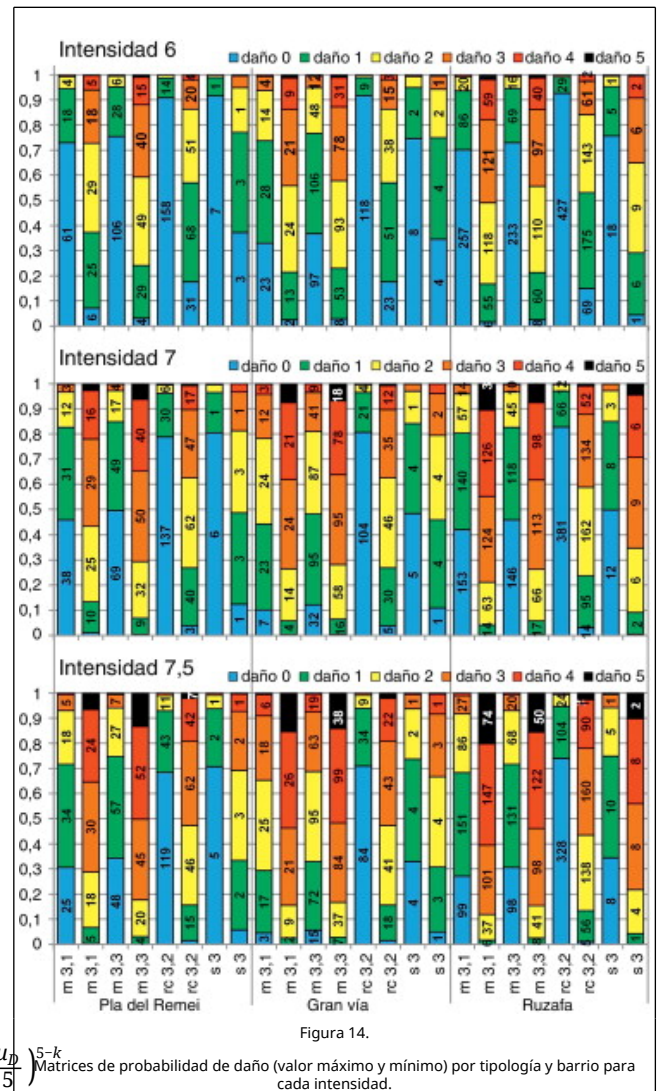
$$\text{Función beta: } a \leq x \leq b; a = 0; b = 6 \quad p_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)\Gamma(r)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(-a)^{t-1}}{(b-x)^{t-r-1}} \quad (3)$$

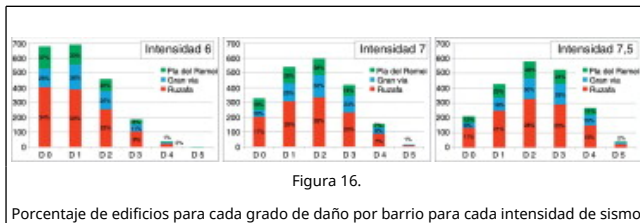
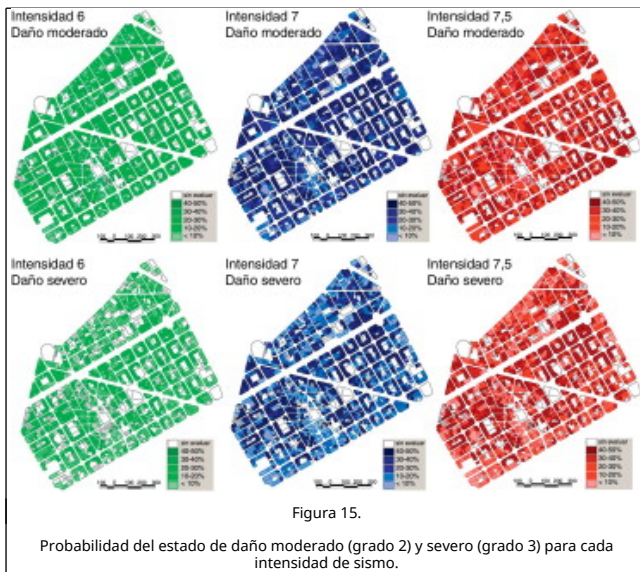
La distribución beta acumulada (4) permite obtener la probabilidad de que el estado de daño se encuentre entre 0 y  $x$ ; y, por tanto, la probabilidad (5) asociada a cada uno de los estados de daño ( $D_k$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) para las 3 intensidades consideradas, obteniéndose las matrices de probabilidad de daños de los edificios en cada parcela.

$$P_\beta(k) = \int_0^x p_\beta(y) dy \quad (4)$$

$$p(k) = \int_k^{k+1} p_\beta(y) dy = P_\beta(k+1) - P_\beta(k) \quad (5)$$

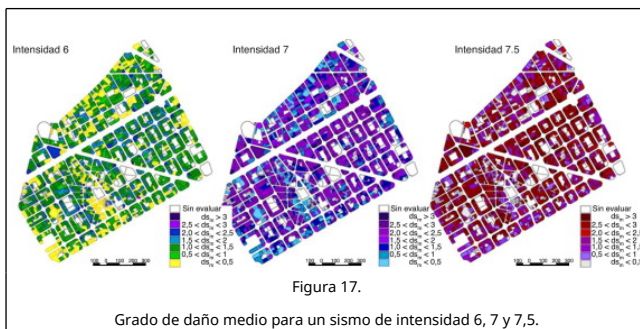
Para cada escenario considerado (intensidad 6, 7 o 7,5) se representan, en la figura 14, los valores máximos y mínimos de la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño (matrices de probabilidad de daño), por tipología y barrio, en valor absoluto y porcentaje; en la figura 15, los mapas de probabilidad de daño moderado (grado 2) y severo (grado 3) y, en la figura 16, el porcentaje de edificios por barrio cuyo estado probable de daño es D0, D1, D2, D3, D4 y D5.





Finalmente, el estado o grado de daño medio (estado de daño más probable),  $ds_m$  (6) se determina a partir de la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño  $i$ ,  $P[D_i]$ , siendo  $N = 5$ . Los valores obtenidos para  $ds_m$  se representan en los mapas de la figura 17.

$$ds_m = \sum_{i=0}^N i P[D_i] \quad (6)$$



## 5. Daños a la población

El análisis del riesgo sísmico se completa con la evaluación de las posibles víctimas y el número de personas sin hogar en cada barrio para cada uno de los escenarios considerados.

El modelo utilizado para evaluar las pérdidas (humanas y económicas) considera la probabilidad de alcanzar cada uno de los grados de daño obtenidos con la función beta y la clase de edificio. El número de posibles víctimas  $K_s$ , teniendo en cuenta la gravedad de las heridas, se estima con la expresión (7) [3]:

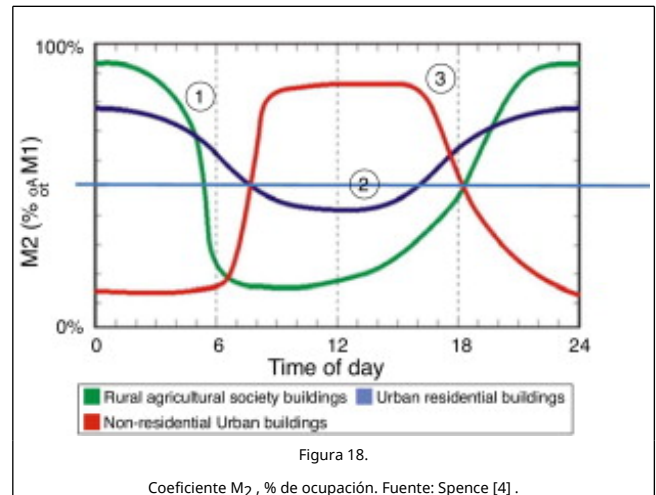
$$K_s = C \cdot [M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot (M_4 + M_5 \cdot (1 - M_4))] \quad (7)$$

siendo:

$C$ : número de edificios colapsados (número de edificios de cada tipología multiplicado por la probabilidad de colapso [daño 5]).

$M_1$ : número de personas que residen en cada edificio. Su valor se obtiene, para cada barrio, en función del número de habitantes (Ayuntamiento de Valencia, 2012) y de la superficie construida, calculada a partir de los datos del catastro. La superficie construida en Pla del Remei es 405.576 m<sup>2</sup> y el ratio de ocupación de 60 m<sup>2</sup> construidos por cada habitante; en Gran Vía, la superficie construida es 564.413 m<sup>2</sup> con una ocupación de 47,7 m<sup>2</sup> construidos por cada habitante y, en Ruzafa, la superficie construida es 1.081.649 m<sup>2</sup> y el ratio por habitante es 44,1 m<sup>2</sup> construidos. Aplicando a cada edificio el ratio de ocupación por barrio se le asigna, en función de su superficie construida, el número de habitantes.

$M_2$ : porcentaje de ocupación. Se obtiene de la gráfica de la figura 18 [3] and [4], en función de la hora del día. Se han tenido en cuenta 2 situaciones: la de mayor ocupación que correspondería al periodo nocturno (a las 24 h) y la de menor ocupación (a las 12 h). Según la línea horizontal de la figura sería un 80% y un 42%, respectivamente. No obstante, como en ese distrito la media de población mayor de 80 años es del 8%, se ha considerado un coeficiente de ocupación del 50%.



$M_3$ : porcentaje de personas atrapadas. Teniendo en cuenta los porcentajes propuestos por Coburn y Spence [3] se ha adoptado, para las estructuras de mampostería, un 5% (sismos de intensidad 6 y 7) y un 20% (sismo de intensidad 7,5) y para las estructuras de hormigón y acero un 50% en los 3 escenarios.

$M_4$ : porcentaje de víctimas de cada tipo: ilesos, heridos leves, heridos moderados, heridos graves, heridos graves que necesitan hospitalización y personas fallecidas [4]. Los porcentajes adoptados se reflejan en la tabla 4.

Tabla 4.  $M_4$ . Porcentaje de víctimas según el tipo de edificio

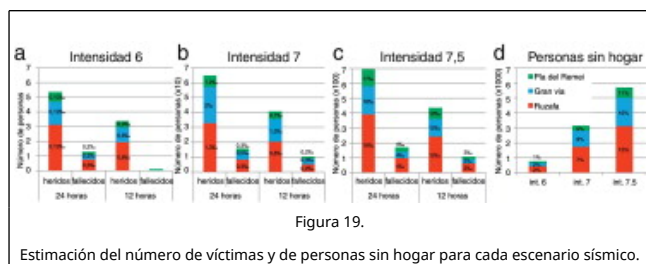
Estado de daño D5					
Ile sos (%)	Heri dos leves (%)	Heri dos modera dos (%)	Heri dos graves (%)	Heridos graves con hospitaliza ción (%)	Falle cidos (%)



Mampostería > 4 pisos	9,4	50	18	12	0,6	10
Hormigón > 4 pisos	9,7	30	27	5	0,3	28
Acero > 4 pisos	10	30	23	4	0,2	32,8

$M_5$ : porcentaje de muertos poscolapso respecto a los atrapados. Al tratarse de una comunidad capaz de organizar actividades de rescate, los valores que se deben tener en cuenta son del 60% para mampostería y del 90% para estructuras de hormigón [3], considerando el mismo valor para las estructuras de acero.

Las posibles víctimas, para una población total de 43.117 habitantes (6.757 en Pla del Remei, 11.838 en Gran Vía y 24.522 en Ruzafa), se representan, en valor absoluto y en el tanto por mil que supone para cada barrio y escenario, en las figuras 19a, 19b y 19c. En ellas se observa que el mayor número de víctimas se produciría en Ruzafa, barrio en el que fallecerían 96 personas y 391 resultarían heridas si ocurriera un sismo de intensidad 7,5 durante el periodo nocturno.



El número de personas sin hogar se determina a partir del número de viviendas que quedarían inhabitables en cada uno de los 3 escenarios estudiados y del ratio de ocupación de las mismas. Para ello, se han seguido las recomendaciones del HAZUS-MH MR3 Technical Manual 2003 [5], que considera inhabitables la totalidad de las viviendas destruidas y el 90% de las que tienen daño completo. El número y porcentaje de personas que quedarían sin hogar respecto a la población de cada barrio, para cada escenario sísmico, se muestra en la figura 19 d.

## 6. Costes económicos

Para estimar las pérdidas económicas debidas a daños estructurales o no estructurales se considera la probabilidad que tiene un edificio de alcanzar cada uno de los posibles estados de daño y su coste de reparación. Según las recomendaciones del HAZUS-MH MR3 Technical Manual 2003 [5], el coste de reparación y/o sustitución del edificio se obtiene multiplicando el área construida por el coste de reposición.

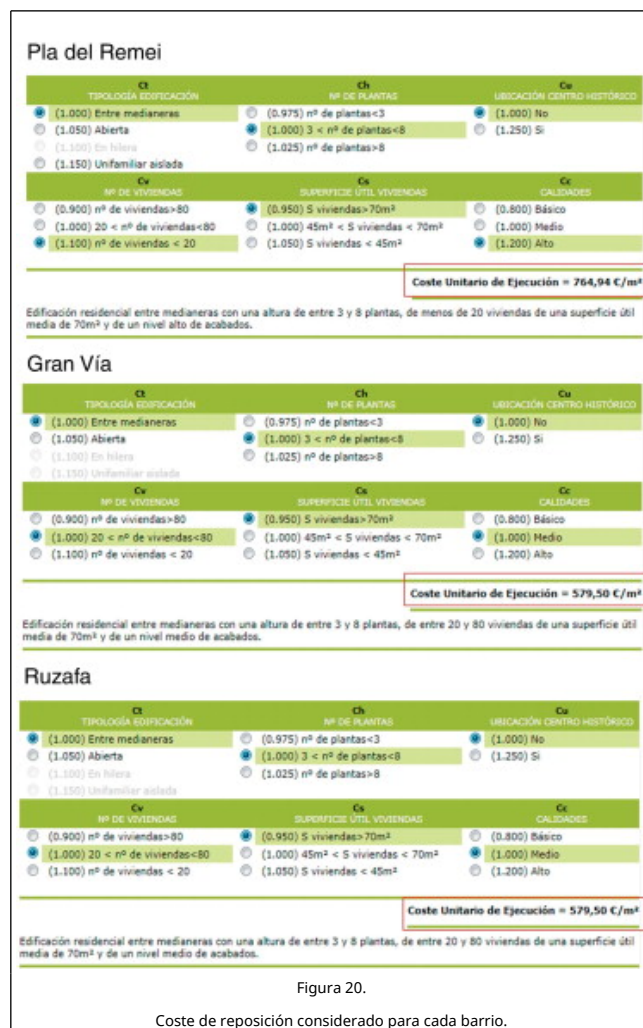
Este coste (8) es función de la calidad de la edificación y de la probabilidad del edificio de alcanzar cada uno de los estados de daño y su coste de reparación por metro cuadrado:

$$C_{ti} = cr_i \cdot Area \cdot \sum_{i=1}^n P d_i \cdot r c_i \quad (8)$$

siendo  $C_{ti}$  el coste de reparación y/o sustitución para el daño  $d_i$ ;  $cr_i$ , el coste de reposición;  $P d_i$ , la probabilidad del edificio de alcanzar el estado de daño  $d_i$ ; y  $rc_i$  el ratio de coste de reparación de la estructura y los elementos no estructurales

(tablas 15.2, 15.3 y 15.4) del Hazus-MH MR3 Technical Manual [5].

El coste de reposición de los edificios,  $cr_i$ , se ha calculado con los datos del Instituto Valenciano de la Edificación [23], considerando que se trata de edificios de uso residencial y teniendo en cuenta, en cada uno de los barrios, la calidad media de la edificación (fig. 20).

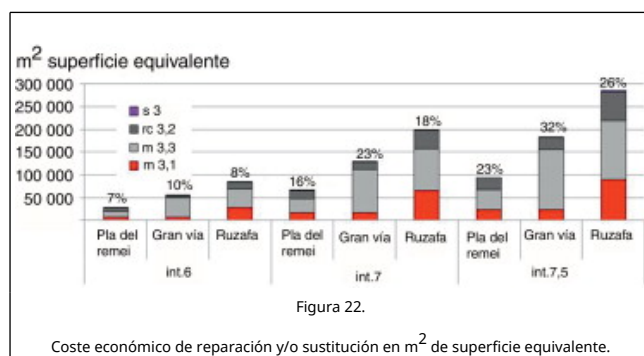
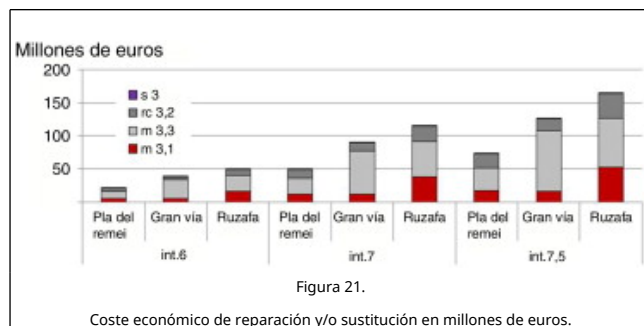


El valor del ratio de coste de reparación de la estructura y de los elementos no estructurales se ha obtenido teniendo en cuenta la equivalencia de grados de daño entre las escalas EMS-98 [21] y la ATC-25 [24]. De este modo, los ratios de coste considerados corresponden a la suma de los costes de reparación estructural y los costes de reparación de los elementos no estructurales, tal y como se indica en la tabla 5.

Tabla 5. Ratios de coste de reparación de la estructura y de los elementos no estructurales

Dañó (EMS-98)	D1	D2	D3	D4+D5
ATC-25	Leve	Moderado	Extremo	Completo
Elementos estructurales	0,3	1,4	6,9	13,8
Elementos no estructurales	1,7	8,6	34,4	86,2
Total	2%	10%	40%	100%

Considerando, para cada uno de los 3 escenarios, las probabilidades de cada estado de daño, los costes de reparación y la superficie afectada, se obtiene el valor del coste económico de reparación y/o sustitución, para cada barrio y tipo de estructura, en millones de euros (fig. 21) y en superficie equivalente (fig. 22).

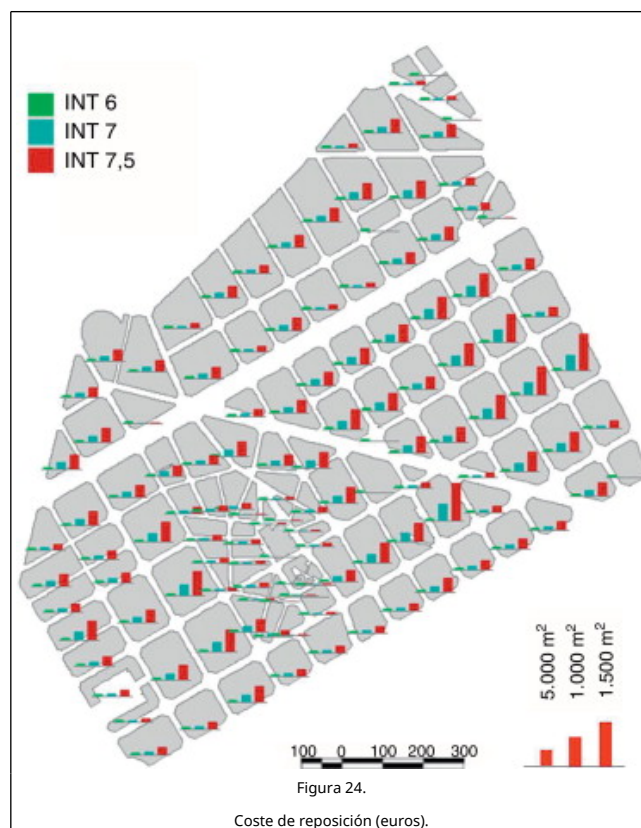
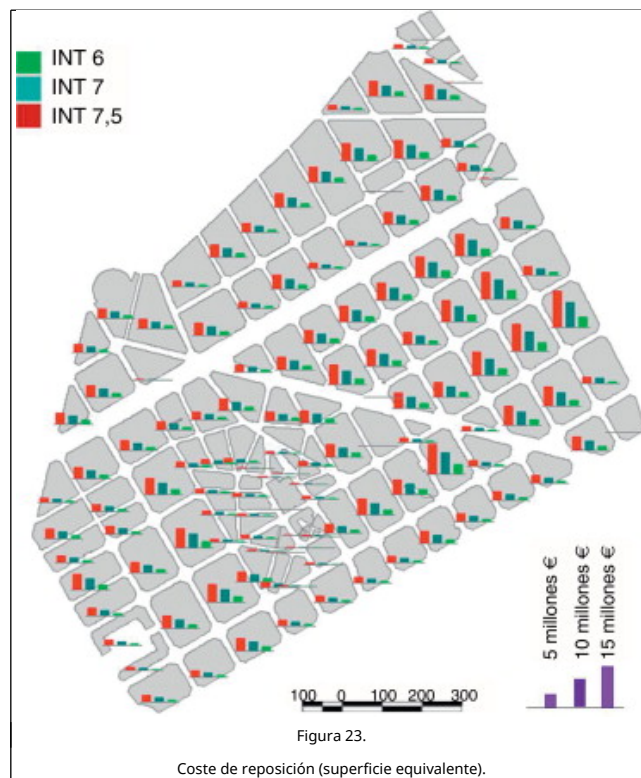


En estas gráficas se observa que aproximadamente un 25% de la superficie construida de uso residencial de Pla del Remei y Ruzafa y más del 30% de Gran Vía deberá ser reparada en el caso de un sismo de intensidad 7,5.

Esta superficie corresponde principalmente a estructuras de mampostería de edificios históricos, independientemente del barrio y del escenario estudiado. Se trata de edificios, la mayoría con algún grado de protección, cuyo valor no es únicamente el coste de reposición, ya que su pérdida supone mucho más que los daños meramente materiales.

Es imprescindible, a la vista de estos resultados, propiciar el refuerzo de aquellas estructuras de mampostería con algún nivel de protección, evitando, en la medida de lo posible, entrar en conflicto con el valor histórico de las mismas con el fin de preservarlas y evitar su posible ruina en caso de sismo.

Para identificar las manzanas más afectadas, se ha representado el coste económico en términos de superficie equivalente para cada manzana y escenario sísmico (fig. 23). Como el coste de reposición varía según el barrio en el que se ubique la manzana, en la figura 24 se indica el coste en euros considerando los valores del coste de reposición de la figura 20.



## 7. Conclusiones

Se ha determinado la vulnerabilidad sísmica de los edificios del distrito del Eixample de Valencia mediante el método del VI. La calidad de la base de datos desarrollada al efecto ha permitido caracterizarlos uno a uno, identificando los más vulnerables y

analizando los elementos concretos que aumentan dicha vulnerabilidad.

Los resultados se han representado mediante un sistema de información geográfica en forma de mapas de vulnerabilidad y de escenarios de daño para sismos de intensidades 6, 7 y 7,5 y se ha evaluado el riesgo sísmico, determinando las consecuencias de tipo económico y social.

Los resultados obtenidos en este distrito de la ciudad de Valencia confirman que, pese a no encontrarse en una zona de alta peligrosidad, la vulnerabilidad es elevada y el riesgo sísmico apreciable, no solo en términos de pérdidas humanas sino también de pérdidas económicas y patrimoniales. Así, para el sismo menos intenso se producirían 7 víctimas (si este ocurriera en las horas de máxima ocupación) y más de 700 personas quedarían sin hogar, aumentando esta cifra hasta 865 y casi 6.000, respectivamente, para el más intenso.

Por otra parte, la superficie construida de uso residencial que necesitaría ser reparada (principalmente estructuras de mampostería y, por tanto, de gran valor histórico) sería del 25, 57 u 82%, tras un sismo de intensidad 6, 7 o 7,5, respectivamente.

Se recomienda, por tanto, establecer criterios de intervención no solo en edificios protegidos, para salvaguardar el patrimonio, sino en todos los que no sean sísmicamente seguros, y extender este método de evaluación de la vulnerabilidad y la representación de los escenarios de riesgo a otros distritos de interés arquitectónico de la ciudad de Valencia. Para ello, y con objeto de poder considerar adecuadamente el efecto del suelo en los futuros estudios de vulnerabilidad sísmica, sería necesario realizar una microzonificación sísmica de la ciudad.

Asimismo, se debería evaluar la vulnerabilidad de todos los edificios del distrito del Eixample incluidos en procesos y planes de rehabilitación, especialmente los protegidos, aplicando métodos más avanzados y precisos (como, por ejemplo, el método basado en el espectro de capacidad [14] and [25]).

## Agradecimientos

La información para la elaboración de este trabajo ha sido proporcionada por la Gerencia Regional del Catastro de Valencia y por el Archivo de Arquitectura y Urbanismo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia.

## Bibliografía

- [1] P. Mouroux, B. le Brun; Presentation of RISK-UE Project; Bull. Earthquake. Eng., 4 (2006), pp. 323-339 <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3> Springer Science+Business Media B.V.
- [2] L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada; Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona (España); Intersections, 4 (2007), pp. 3-37 article No.1
- [3] A. Coburn, R. Spence; Earthquake Protection; (2nd ed.) John Wiley and Sons, Chichester (2002)
- [4] R. Spence (Ed.), Earthquake Disaster Scenario Predictions and Loss Modeling for Urban Areas, en: LESSLOSS European Research Project for Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides (2004-2007); report n.º 2007/07. Disponible en: <http://www.lessloss.org/main/index.php> [último acceso 23 Dic 2012].
- [5] FEMA/NIBS, HAZUS-MH MR3 Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake model, Washington, D.C., USA, 2003.

[6] Ayuntamiento de Valencia, Oficina de Estadística, Datos sociodemográficos de los Barrios de Pla del Remei, Gran Via y Ruzafa, 2012. Disponible en: <http://www.valencia.es/> [último acceso 21 Ene 2013].

[7] R. Temes, El tapiz de Penélope. Transformaciones residenciales sobre tejidos sin valor patrimonial, Tesis Doctoral, UPV, Valencia, 2008. Disponible en: <https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=418485> [último acceso 21 Ene 2013].

[8] Reglamento para aplicación del Decreto sobre las restricciones del hierro en la edificación del 11 de marzo 1941, BOE 2/08/1941, Madrid, 1941.

[9] MV 101-1962. Norma «Acciones en la Edificación», BOE 9/02/1963, Madrid 1963.

[10] PGS-1 (1968), Norma Sismorresistente, Parte A. BOE 4/02/1969, Madrid 1969.

[11] PDS-1 (1974), Norma Sismorresistente, BOE 21/11/1974, Madrid 1974.

[12] NCSE-94, Norma de Construcción Sismorresistente, Parte General y Edificación, BOE 8/02/1995, Madrid, 1995.

[13] NCSE-02, Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, BOE 11/10/2002, Madrid, 2002.

[14] Z. V. Milutinovic, G.S. Trendafiloski, Vulnerability of Current Buildings. Risk-UE WP4 Handbook. Risk-UE project, contract: EVK4-CT-2000-00014 (2003).

[15] N. Lantada, Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona, Tesis Doctoral, U.P. Cataluña, Barcelona, 2007. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/6259> [último acceso 21 Ene 2013].

[16] N. Lantada, J. Irizarry, A.H. Barbat, X. Goula, A. Roca, T. Susagna, et al.; Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method; Bull. Earthquake. Eng., 8 (2010), pp. 201-229 <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-009-9148-z> Springer Science+Business Media B.V.

[17] X. Goula, A. Barbat, M. Carreño, N. Lantada, J. Varcárcel, J. Irizarry, et al. Spanish-French-Portuguese field investigation of the 11th May Mw5.1 earthquake in Lorca (Murcia, Spain) (2011). Disponible en: <http://www.afps-seisme.org/index.php/fre/Seismes-majeurs/Seisme-a-Lorca> [último acceso 5 Dic 2012].

[18] J.J. Giner, S. Molina, P.J. Jáuregui; Sismicidad en la Comunidad Valenciana; Física de la Tierra, 15 (2003), pp. 163-187 [consultado 5 Dic 2012]. Disponible en: <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/12668>

[19] Unidad de Registro Sísmico Universidad de Alicante (U.R.S.U.A.): Mapa Catálogo de terremotos con intensidad (EMS-98) mayor o igual a VI. Mapas de Intensidad sísmica esperada en la Comunidad Valenciana incluyendo efecto del sitio para 500 años y 1000 años [consultado 5 Dic 2012]. Disponible en: <http://web.ua.es/ursua>

[20] R. Franklin, J.O. Caselles, J.A. Canas, J. Clapes, L.G. Pujades; Estimación de la respuesta del sitio mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental. Aplicación a la Ciutat Vella de Valencia; Rimni, 22 (2) (2006), pp. 169-191 ed. CIMNE [consultado 5 Dic 2012]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099/4746>

[21] G. Grunthal; European Macroseismic Scale 1998; Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg (1998)

[22] S. Giovinazzi; The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. PhD Thesis; T.U. Braunschweig, Alemania (2005)

[23] Instituto Valenciano de la Edificación (IVE), Coste unitario de



ejecución de edificación residencial, 2013. Disponible en: <http://www.five.es/inicio/economia/457.html> [último acceso 12 Enero 2013].

[24] ATC-25 (Applied Technology Council), 1991, Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Redwood City, California, Applied Technology Council Report.

[25] J. Irizarry, N. Lantada, L.G. Pujades, A.H. Barbat, X. Goula, T. Susagna, *et al.*; Ground-shaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the risk-UE capacity spectrum based method; Bull. Earthquake. Eng., 9 (2011), pp. 441–466 [consultado 5 Dic 2012] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-010-9222-6>